شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری توپوگرافی بستر در قوس با آبگیر جانبی با مدل عددی SSIIM2 ★

حسین آسیائی[۱]		حسین منتصری[۲]

چکیده الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس رودخانه‌ها به‌دلیل وجود جریان حلزونی دارای پیچیدگی فراوانی است. غالب مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مورفولوژی رودخانه‌ها به مطالعه‌ی تغییرات توپوگرافی بستر پرداخته‌اند و مکانیسم‌های شکل‌گیری و تغییرات تراز بستر ناشناخته مانده‌اند. در تحقیق حاضر روند شکل‌گیری توپوگرافی بستر در یک کانال قوسی ۱۸۰ با آبگیر جانبی و مکانیسم‌های ورود رسوبات به آبگیر توسط مدل SSIIM2 شبیه سازی شده‌است. برای مشاهده‌ی نحوه‌ی شکل‌گیری فرم‌های بستر، مدل با زمان‌های مختلف اجرا شده و خروجی‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. هم‌چنین اثر دبی آبگیری بر نحوه‌ی حرکت رسوبات و مکانیسم‌های ورود رسوبات به آبگیر بررسی شده‌است. نتایج حاصل از مدل عددی نحوه‌ی حرکت رسوبات در قوس، مکانیسم‌های ورود رسوبات به آبگیر، محل تشکیل دیون‌های متناوب در بالادست آبگیر، محل تشکیل پشته‌های رسوبی را به‌خوبی شبیه‌سازی نموده‌است. هم‌چنین توپوگرافی بستر در زمان تعادل و ارتفاع تراز بستر در مقاطع عرضی مختلف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است و خطای محاسبه شده نشان داد که بیشترین اختلاف در جلوی دهانه‌ی آبگیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی، توپوگرافی بستر، قوس ۱۸۰ درجه، آبگیر جانبی، تزریق رسوب.

Numerical Investigation of Formation of Bed Topography in a U Shape Channel Bend with Lateral Intake with SSIIM2

H. Asiaei		H. Montaseri

Abstract *The mechanism of flow and sediment transport in channel bend is much complex. Because of secondary current, the sediment moves away from outer bank toward inner bank and therefore outer bank of the bend is one of best positions for lateral diversion. In this paper, the mechanism of sediment transport was simulated with SSIIM software in the U shape channel with lateral intake. In order to verify the numerical model results used in Montaseri's lab studies, The position of injection was upstream of bend and sediment injection rate was approximately is equal to 250 gr/min and Frude number is equal to 0.32. The SSIIM numerical model solves the Navier-Stokes equations with the k-ε model on a three-dimensional. The bed load can be calculated Van Rijn' formula. The numerical model has been implemented at various times to see how the formation and development of bed forms in the U shape channel with lateral intake. The numerical results show that the prediction of development of bed forms, mechanism of sediment entry to intake, location of intermittent dune and location of sediment accumulation are in fairly good agreement with experimental data and the maximum error occurred in front of intake.*

Keywords Sediment Transport, U Shape Channel, lateral Intake, Injection of Sediment, Bed Form.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۹/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۹/۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۲) استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج.

مقدمه

مسئله‌ی انتقال رسوب یکی از موضوعات جالب توجه برای طیف گسترده‌ای از علوم و شاخه‌های مهندسی می‌باشد. به بیان ساده پدیده‌ی انتقال رسوب عبارت است از فرسایش رسوبات از یک مکان و انتقال آن به‌وسیله‌ی جریان آب به مکان دیگر. ذرات رسوب به سه شیوه‌ی غلتیدن (لغزش)، جهیدن و به صورت معلق شدن انتقال می‌یابند. بر این اساس انتقال ذرات رسوب به صورت بار معلق و بار بستر تقسیم‌بندی شده است. اگرچه بیشتر رسوبات به‌صورت بار معلق انتقال پیدا می‌کنند ولی بار بستر عامل مهمی در نحوه‌ی تشکیل فرم بستر مانند ایجاد ریپل ها و دیون ها دارد. این پدیده‌ها نیز در مراحل بعد بر روی شرایط جریان تأثیر می‌گذارد.

مکانیزم جریان در آبراهه های قوسی بسیار پیچیده‌تر از آبراهه‌های مستقیم است. از مشخصه‌های ویژه‌ی آبراهه های قوسی می‌توان به وجود جریان حلزونی در آنها اشاره نمود که از اندرکنش جریان ثانویه در مقطع عرضی و جریان طولی آبراهه حاصل می شود. جریان حلزونی نقش به سزایی در شکل‌گیری پروفیل عرضی، تراز بستر و تنش برشی در کف آبراهه ها دارد. در اثر وجود جریان ثانویه مشاهده می‌گردد، حرکت عرضی رسوبات در کف آبراهه‌ها به‌نحوی است که رسوبات را از ساحل خارجی به ساحل داخلی هدایت می‌کند. با توجه به این‌که یکی از اهداف مهم در طراحی آبگیر جانبی، انتخاب محلی است که رسوبات کمتری وارد آبگیر گردد، بنابراین ساحل خارجی رودخانه ها می‌تواند به‌عنوان مکان مناسبی برای احداث آبگیر جانبی محسوب شود. اندرکنش جریان حلزونی قوس و الگوی سه‌بعدی جریان در آبگیرهای واقع در قوس خارجی رودخانه بر پیچیدگی مکانیسم‌های جریان و رسوب می‌افزاید.

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل SSIIM2 به شبیه‌سازی عددی تغییرات زمانی توپوگرافی بستر با روش تزریق رسوب روی بستر صلب در یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه با آبگیر جانبی پرداخته شده‌است.

مروری بر مطالعات انجام‌شده

مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری روی جریان و رسوب در آبراهه‌های قوسی انجام گرفته‌است. رزوفسکی [1] و یان [2] به بررسی مشخصات جریان و توزیع تنش برشی در قوس با بستر صلب پرداختند. یان (۱۹٦۷) نیز مشخصات جریان و اندرکنش آن با تغییرات بستر را مورد مطالعه قرار داد nb [3]. انگلند [4] کیکاوا و همکاران [5] و فالکن و کندی [6] شرح دقیق‌تری از جریان و شکل تغییرات بستر در رودخانه‌های قوسی با جریان دائم ارائه کردند. آلن در سال ۱۹۷۰ به بررسی اثر غیریکنواختی مصالح بر موقعیت پشته‌ی رسوبی با توجه به نیروهای وارد بر ذرات رسوب در بستر آبرفتی پرداخت [7]. کخ و فلوکسترا در سال ۱۹۸۱ نیز با انجام آزمایش‌هایی بر روی کانال قوسی ۱۸۰ درجه با رسوبات دارای دانه‌بندی یکنواخت، به بررسی تغییرات بستر پرداختند [8]. ادگارد (۱۹۸۲) با توجه به مفهوم تنش برشی بحرانی و تعادل نیروها، بین مؤلفه‌ی عرضی تنش برشی و مؤلفه عرضی وزن، توزیع اندازه‌ی دانه ها در عرض کانال قوسی را تعیین نمود [9]. ادگارد و برگس (۱۹۸۸) با انجام آزمایش‌هایی بر روی کانال قوسی ۱۸۰ درجه با مقطع ذوزنقه‌ای شکل به بررسی تغییرات بستر و اندرکنش آن با میدان سرعت پرداختند و علت نوسانی بودن بستر واقع در منطقه توسعه‌یافته (نیمه‌ی دوم قوس) را ناشی از الگوی نوسانی بردار عرضی سرعت در امتداد طولی کانال معرفی نمودند [10].

مطالعه‌ی الگوی جریان و توپوگرافی بستر در قوس رودخانه‌ها در داخل کشور نیز مورد توجه قرار گرفته است که از مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات شفاعی بجستان و نظری در سال ۱۳۷۸ اشاره نمود که به اثر زاویه‌ی آبگیری بر میزان رسوب ورودی به آبگیر جانبی پرداختند [11] هم‌چنین پیرستانی (۱۳۸۳) با انجام مطالعات آزمایشگاهی در یک قوس ۱۸۰ درجه به بررسی اثر موقعیت و زاویه‌ی آبگیری بر الگوی جریان ورودی به آبگیر پرداخت [۱۲]. دهقانی (۱۳۸۵) به بررسی اثر موقعیت و زاویه‌ی

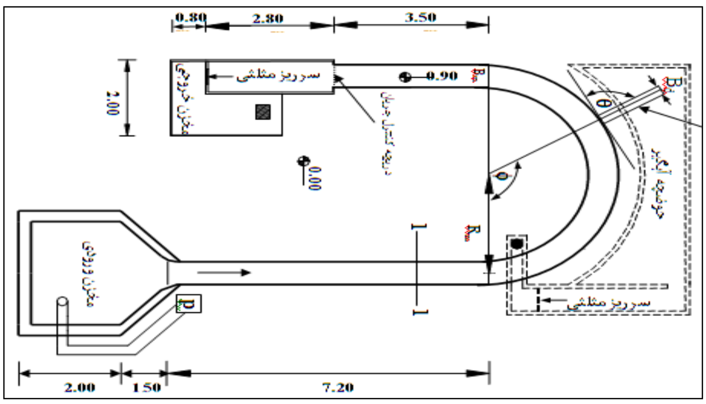
انحراف آبگیر جانبی بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه پرداخت [۱۳]. ابوالقا سمی (۱۳۸۵) در یک کانال مئاندری به بررسی توپوگرافی بستر با حضور آبگیر جانبی پرداخت [١٤] هم‌چنین منتصری (۱۳۸۷) در قسمتی از پایان‌نامه‌ی دکترای خود به بررسی نحوی حرکت ر سوبات تزریق شده در یک کانال قو سی ۱۸۰ درجه با بستر صلب و آبگیر جانبی برای دبی‌های آبگیری متفاوت و اعداد فرود متفاوت پرداخت [۱۵].

اما در زمینه‌ی شبیه‌سازی با مدل عددی SSIIM می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

منصوری در سال ۱۳۸۵ در قالب پایان‌نامه‌ی کار شنا سی ار شد به شبیه سازی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با بستر صلب و نیز تغییرات تراز بستر متحرک با ا ستفاده از مدل عددی SSIIM پرداخت و ن‌شان داد که مدل عددی توانایی خوبی در مدل‌سازی الگوی جریان و تغییرات تراز بستر مورد انتظار در قوس ۱۸۰ درجه به‌خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده‌است [١٦]. شکیبائی‌نیا و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از مدل عددی SSIIM به شبیه‌سازی جریان و محاسبه‌ی سطح آزاد و محاسبه‌ی تغییرات توپوگرافی بستر در آبگیری از یک مسیر مستقیم پرداختند و نشان دادند مدل عددی قادر است توزیع سرعت و جریان‌های چرخشی را به‌خوبی مدل سازی نماید. در پیش‌بینی تغییرات بستر و عمق آب‌شستگی، مدل روند تغییرات بستر را هم در مدل آزمایشگاهی و هم در مقایسه با اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌خوبی نشان می‌دهد ولی عمق حفره‌ی آب‌شستگی را کمتر و محل آن را ا ندکی جلوتر پیش‌بینی می‌نماید[١٧]. کرمی‌مقدم و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در آبگیر ۳۰ درجه منشعب از کانال ذوزنقه‌ای در مسیر مستقیم پرداختند و نشان دادند با افزایش نسبت آبگیری مقدار عرض صفحه تقسیم جریان افزایش می‌یابد [۱۸].

مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مربوط به مطالعات منتصری (۱۳۸۷) می‌با شد. این مدل شامل یک کانال U شکل با شعاع متو سط ۲/٦ متر و عرض ۰/٦ متر می‌با شد. شکل (۱) نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در قسمت بالادست قوس یک کانال مستقیم به طول ۷/۲ متر و در پایین‌دست قوس کانال مستقیمی به طول ۵/۲ متر وجود دارد. جداره‌های کانال از جنس پلکسی گلاس و کف کانال از جنس شی‌شه ا ست. در موقعیت ۱۱۵ درجه از قوس، کانال آبگیر با زاویه‌ی ٤٥ درجه نسبت به امتداد جریان در کانال اصلی نصب گردید. عرض و طول کانال آبگیر به‌ترتیب ۲۵ سانتی‌متر و ۲/۵ متر می‌باشد [۱۵].



شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی همراه با آبگیر جانبی

دبی جریان در مدل آزمایشـــگاهی ٤٠ لیتر بر ثانیه و دبی آبگیری ٣٠٪ و عدد فرود جریان ٠/٣٢ می‌با شد. در مدل آزمایشگاهی برای مطالعه‌ی تغییرات توپوگرافی بستر، از روش تزریق رسوب روی بستر صلب استفاده شدها ست. لذا پس از تنظیم جریان، تزریق ر سوبات با دانه‌بندی یکنواخت و قطر متوسط ١/٢٨ میلی‌متر توسط د ستگاه تزریق ر سوب به صورت پیو سته از بالاد ست قوس انجام شـــده‌اســـت. محل تزریق رســـوبات ٢ متر بالاتر از ابتدای قوس که شرایط جریان یکنواخت برقرار ا ست، انتخاب شدها ست. نرخ د ستگاه تزریق ر سوب برابر حداکثر قدرت حمل جریان انتخاب گردیده‌اســـت تا رسوب‌گذاری در مسیر بالادست قوس انجام نشود و فقط رسوب‌گذاری در قوس و تحت اثر جریان حلزونی قوس و اندرکنش آن با آبگیر صورت گیرد. نرخ تزریق رســـوب برابر ٢٥٠ گرم بر دقیقه در مدل آزمایشـــگاهی انتخاب شـــده‌اســـت که همین مقدار نیز در مدل عددی اعمال گردید. زمان انجام آزمایش‌ها ٦ ســـاعت انتخاب گردیده‌است. برای اندازه‌گیری سرعت در آزمایشگاه از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی وکترینو که نمونه‌ی جدید ســـرعت‌ســـنج‌های ADV اســـت و برای برداشـــت توپوگرافی بستر از متر لیزری استفاده می‌شود. دقت این وسیله در حد صدم میلی‌متر است.

با توجه به شرایط آزمایشگاهی حرکت ر سوبات به‌صـــورت بار بســـتر می‌باشـــند. طبق معیار فن راین (١٩٨٤) برای آن‌که ذرات به‌صـــورت بار بســـتر حرکت نمایند و معلق نشـــوند باید رابطه‌ی (١) برقرار باشـــد [19]:

$$\frac{u_*}{\omega_s} < 0.25 \quad (١)$$

در رابطه‌ی بالا u_* و ω_s به‌ترتیب سرعت بر شی و ســـرعت ســـقوط می‌باشـــد که از روابط زیر به‌دســـت می‌آید:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} = \sqrt{gRS_0} \quad (٢)$$

$$\omega_s = 1.1[(s-1).g.d]^{0.5} \quad (٣)$$

که در روابط فوق τ_b تنش بر شی ب ستر، R شعاع هیدرولیکی و S_0 شیب ب ستر، s چگالی ذرات ر سوب و d قطر متوسط ذرات رسوب می‌باشد.

مدل عددی

امروزه مدل‌های عددی دوبعدی و ســـه‌بعدی گوناگونی با توانایی‌هایی متفاوتی در زمینه‌ی حل میدان جریان و رســـوب وجود دارد. به‌طور کلی این مدل‌های عددی دینامیک سیالاتی (CFD) را می‌توان به دو د سته‌ی کلی تقســیم‌بندی کرد، دسته‌ی اول مدل‌هایی هســتند که از آنها برای اهداف متفاوت اســـتفاده می‌شـــود و در واقع همه‌منظوره هســـتند مانند: FLOW-3D،FLUENT و CFX. اما دسته‌ی دوم مدل‌های عددی هستند که به‌طور خاص برای تحقیقات در زمینه‌ی مهندســـی رودخانه طراحی شـــده‌انـد مـانـنـد: DELFT3D، MIKE 21، CCHH3D و SSIIM.

مدل SSIIM در سال‌های ٩١-١٩٩٠ نو شته شده است. این مدل توسط پروفسور السن در دانشگاه علوم تکنولوژی نروژ توسـعه داده شـده‌اسـت. این برنامه در زمینه‌ی مهند سی رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک و رســـوب کاربرد دارد. قابلیت این نرم‌افزار در بررســـی حرکت ذرات ر سوب در ب سترهای متحرک رودخانه و نیز مقاطع پیچیده‌ی هندســـی می‌باشـــد. به این مســـأله، موضـــوعات اندازه‌های مختلف رســـوب، دانه‌بندی، بار بستر و بار معلق، فرم بستر و تأثیرات شیب بستر را نیز می‌توان اضـــافه کرد. در تغییرات و به‌روزرســـانی‌های جد ید این بر نا مه، مدل های مربوط به شـــرایط خشـک‌شـدن- ترشـدن در شـبکه‌های غیرمنظم برای مدل سازی مقاطع پیچیده مورفولوژی فراهم شدها ست. مدل SSIIM2 معادله‌ی ناویر- استوکس با استفاده از دو مدل آ شفتگی k-ε ا ستاندارد و در حالت RNG در یک محیط ســـه‌بعدی و شـــبکه‌ی غیرمتعامد در حالت جریان‌های پایدار و ناپایدار تحلیل می‌شـــود. در این تحل یل از روش حجم کنترل همراه با اســـت فاده از طرح‌های قانون توانی و مرتبه دوم بالادســـتی اســـتفاده می شود. برای جفت شدگی و همسان سازی فشارها از

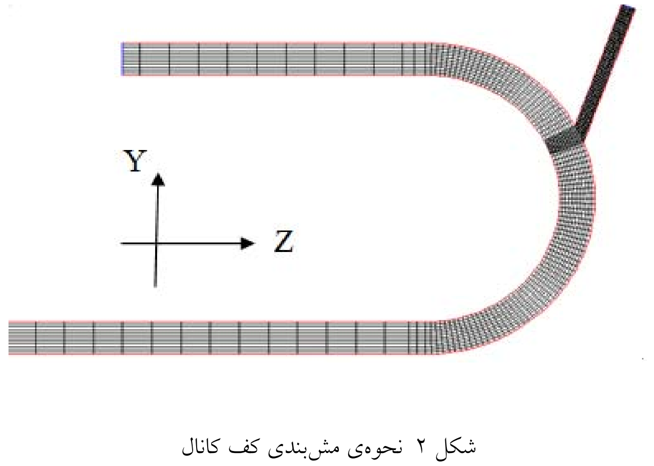
الگوریتم SIMPLE ا ستفاده می شود. در این تحلیل از روش‌های ضمنی برای تولید میدان سرعت در هند سه بهره‌گرفته می شود. کاربر قادر می‌با شد تمامی ضرایب تجربی مدل‌های آشـــفتگی را به‌منظور بهبود نتایج تغییر دهد[20].

شرایط مرزی

یکی از تنظیمات اصـــلی مدل اعمال شـــرایط مرزی به مدل است. برای اعمال شرایط مرزی سرعت و آشفتگی در ورودی بالادســـت میدان، از شـــرط مرزی دیریکله ا ستفاده شدها ست. ا ستفاده از شرط مرزی دیریکله به این معناســـت که مقادیر متغیرها در مرز معین باشـــد. اعمال این شـــرایط در مدل SSIIM2، با تعیین دبی و تراز سطح آب در پایین‌دست و هم‌چنین مشخص کردن عدد استریکلر اعمال می‌شود. هم‌چنین در این مرز لازم است تا مقادیر پارامترهای آشفتگی نظیر انرژی جنبشی (k) و استهلاک (ε) به مدل اعمال شود. در مرز خروجی با تو جه به طول مســـیر مســـتقیم بعد از قوس در پایین‌دســـت، برای تمام متغیرها شـــرایط مرزی گرادیان صفر اعمال می‌شود. شرط عدم تغییر مشخصات جریان در جهت عمود بر مرز خروجی با این طول در مقطع خروجی حا صل شود. در سطح آب نیز، شرط مرزی گرادیان صـــفر برای تمام متغیرها به‌جز انرژی جنبشـــی (k) اعمال می‌گردد و برای پارامتر مزبور نیز در ســـطح آب مقدار صـــفر اعمال می‌شـــود. برای شـــرایط مرزی جداره، SSIIM از قانون جداره برای مرزهای زبر در سلول‌های مجاور جداره استفاده می‌شود.

مش‌بندی میدان جریان

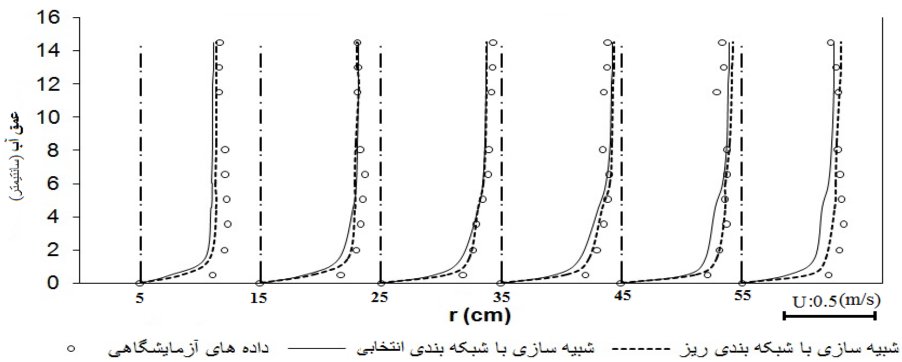
مش‌بندی میدان مورد مطالعه بســـیار حائز اهمیت می‌باشد. زیرا نحوه‌ی مش‌بندی در سرعت هم‌گرا شدن و دقت نتایج مدل بسیار حائز اهمیت می‌با شد. بنابراین با تو جه به اهمیت نواحی مختلف، مش‌بندی های متفاوتی انجام گردیده‌است. در دو قسمت مستقیم کانال فاصـــله‌ی مش‌ها مقادیر بزرگ‌تری نســـبت به مش‌های موجود در قوس دارند و دهانه‌ی آبگیر مش‌بندی دارای مقادیر ریزتری نســـبت به ســـایر نقاط قوس می‌باشـــد. نکته‌ی مهم دیگری که در مش‌بندی میدان جریان در SSIIM2 وجود دارد این اســـت که به‌دلیل ســـاختار پیچیده‌ی فایل unstruc قادر به ســـاخت هندســـه‌های پیچیده نمی‌باشـــیم بنابراین کانال قوســـی ۱۸۰ درجه در SSIIM1 ساخته می شود و به SSIIM2 انتقال داده می شـود ولی آبگیر به‌دلیل هندســه‌ی ســاده‌تر در SSIIM2 ایجاد شدها ست (شکل ۲). اطلاعات مربوط به فواصل مش‌ها در جدول (۱) آمده‌است.



شکل ۲ نحوه‌ی مش‌بندی کف کانال

جدول ۱ فواصل مش‌بندی میدان حل در راستای طولی، عرضی و قائم در نواحی مختلف

موقعیت	راستای طولی	راستای عرضی		راستای قائم	
		نزدیک دیواره‌ها (0-3cm از دو طرف)	دور از دیواره‌ها	از کف تا تراز 1cm	از تراز 1cm تا تراز 14.5cm
قسمت مستقیم	۰/۳ متر	5mm	20mm	2mm	15mm
کانال قوسی	۲ درجه	5mm	20mm	2mm	15mm
قوس در دهانه‌ی آبگیر	۰/۵ درجه	5mm	20mm	2mm	15mm
کانال آبگیر	۰/۰۶۲۵ متر	16.7mm	16.7mm	2mm	15mm



شکل ۳ بررسی تأثیر شبکه‌بندی بر پروفیل‌های قائم سرعت مماسی مقطع ۳۰ درجه

در ادامه با هدف بررسی عدم وابستگی میدان حل به شبکه‌بندی کوچک‌تر، نتایج شبکه‌ی انتخابی «۱۷×۴۲×۱۹۲» با شبکه‌بندی ریز «۳۰×۶۰×۳۲۲» مقایسه شده‌است و تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته‌است. در شکل (۳) پروفیل‌های قائم سرعت مماسی برای هر دو شبکه ارائه شده‌است. در هر دو شبکه، ترم انتقال معادلات حاکم با استفاده از الگوی جهتمند مرتبه‌ی دوم (SOU) منفصل شده‌اند. برای کوپل کردن ترم‌های سرعت و فشار، الگوریتم SIMPLE به‌کار رفته و با توجه به این‌که برای حل میدان جریان، از شبکه‌ی جابه‌جا نشده استفاده شده‌است، با هدف جلوگیری از ناپایداری در محاسبات سرعت و فشار، روش میان‌یابی رای و چاو [21] به‌کار گرفته شده‌است. با دقت در شکل (۳) مشخص است که هر دو شبکه، توانسته‌اند به‌خوبی نحوه‌ی تغییرات پروفیل سرعت در عمق کانال را پیش‌بینی کنند. با این وجود شبکه‌ی ریزتر از دقت بیشتری در پیش‌بینی پروفیل‌های سرعت به‌خصوص در نواحی نزدیک به بستر نیز همان‌گونه که دیده می‌شود برخوردار است. شبکه‌ی ریزتر توانسته‌است جواب‌های نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در انتخاب شبکه در مدل‌سازی عددی، زمان اجرای محاسبات (CPUTime) می‌باشد. زمان‌های اجرای محاسبات برای دو شبکه به تفکیک در جدول (۲) آورده شده‌است. همان‌طور که دیده می شود با توجه به این‌که زمان اجرای محاسبات شبکه‌ی انتخابی تقریباً ۵ برابر کمتر از شبکه‌ی ریز می‌باشد و هر دو شبکه از دقت قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشند لذا شبکه‌ی انتخابی برای پیش‌بینی میدان جریان مناسب به‌نظر می‌رسد.

جدول ۲ مقایسه‌ی زمان اجرای محاسبات برای دو شبکه‌ی ریز و درشت

شبکه	طرح انفصال	CPU Time (min)
۱۹۲×٤۲×۱۷	SOU	80
۳۲۲×٦۰×۳۰	SOU	370

معادلات حاکم بر میدان جریان

قوانین حاکم عبارتند از قانون بقای جرم و قانون بقای مومنتم که در حالت جریان آشفته و به‌صورت متوسط‌گیری‌شده در زمان، معادلات پیوستگی (٤) و رینولدز (٥) از آنها استخراج می‌شود:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] + \frac{\partial(\overline{-\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j} \qquad (٥)$$

جملات $\overline{-\rho u_i' u_j'}$ به‌عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. این معادلات شامل چهار مجهول مؤلفه‌های سرعت در سه جهت و فشار می‌باشند. از طرفی معادله‌ی مومنتم حاوی شش مؤلفه‌ی مجهول تنش رینولدز است، لذا سیستم معادلات فوق بسته نیست و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش‌های رینولدز محاسبه شوند. در این مقاله از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده‌است. مدل k-ε میزان لزجت گردابه را طبق رابطه زیر محاسبه می‌کند:

$$\upsilon_T = c_\mu \frac{k}{\varepsilon^2} \qquad (٦)$$

در رابطه فوق k انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد که به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i u_j} \qquad (٧)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + P_k - \varepsilon \\ P_k = \upsilon_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \end{cases} \qquad (٨)$$

اتلاف مقدار k به‌صورت ε بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_T}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + c_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_k + c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (٩)$$

معادلات حاکم بر رسوب

برای محاسبه‌ی انتقال رسوبات، آن‌را به دو دسته‌ی بار بستر و بار معلق تقسیم می‌کنند که غلظت بار معلق از معادله‌ی انتقال- انتشار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + w\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i}) \qquad (۱۰)$$

که در آن c غلظت رسوبات، w سرعت سقوط، U سرعت جریان، x بعد فضا و Γ مجموع ضریب پخشیدگی آشفتگی و ضریب پخشیدگی ملکولی می‌باشد و مقدار Γ به‌صورت حاصل تقسیم لزجت آشفتگی ($\nu_t=\mu_t/\rho$) بر عدد اشمیت (که مقدار آن بین ۰/۷ تا ۱/۰ منظور می‌گردد) نوشته می‌شود [20].

$$\Gamma = \frac{\upsilon_t}{\sigma_s} \qquad (۱۱)$$

برای محاسبه‌ی غلظت رسوبات نزدیک بستر در SSIIM از فرمول فن‌راین استفاده می شود، که رابطه‌ی آن به‌صورت زیر می‌باشد:

$$C_{bed} = 0.015\frac{d^{0.3}}{a}\frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right)^{1.5}}{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho \nu^2}\right)} \qquad (۱۲)$$

که در آن C_{bed} غلظت رسوبات نزدیک بستر، d قطر ذرات رسوب، a ارتفاع معادل زبری رسوبات است که مقدار آن زمانی که فرم‌های بستر وجود ندارد، برابر زبری معادل (K_s) و زمانی که فرم بستر وجود دارد برابر نصف ارتفاع متوسط فرم‌های بستر می‌باشد، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی برای حرکت رسوبات، ρ و ρ_s به‌ترتیب جرم واحد حجم آب و دانه‌های رسوبی می‌باشند.

فرمول تجربی بار بستر به‌طور پیش‌فرض Van Rijn استفاده می‌شود که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{q_b}{d_{50}^{1.5}\sqrt{(s-1)g}} = 0.053\frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه که برای ذرات با قطر متوسط ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون ارائه شده‌است، q_b نرخ انتقال بار بستر در واحد عرض و d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب می‌باشد. D_* نیز پارامتر بدون بعد قطر ذره و T پارامتر انتقال می‌باشند و از روابط زیر به‌دست می‌آیند. در این روابط، s چگالی نسبی رسوبات و v لزجت سینماتیکی سیال می‌باشد.

$$D_* = d_{50}\left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱٤)$$

$$T = \frac{\tau-\tau_c}{\tau_c} = \frac{{u'_*}^2 - u_{*_c}^2}{u_{*_c}^2} \qquad (۱۵)$$

u_*' سرعت برشی بستر و u_{*c} سرعت برشی بحرانی نمودار شیلدز است.

نکته‌ی قابل ذکر در مورد مدل عددی SSIIM2 در زمینه‌ی شبیه سازی رسوب این است که مدل علاوه بر فرمول فن‌راین از فرمول‌های دیگری مانند هانسن، وایت، یانگ، هانگ و انیشتین استفاده کند.

واسنجی مدل عددی

پارامتر زبری در SSIIM با دو هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. محاسبه‌ی سطح آب اولیه در کانال برای تعریف هندسه‌ی اولیه‌ی میدان، که با استفاده از الگوریتم یک‌بعدی برگشت آب استاندارد انجام می شود و دیگری محاسبه و پیش‌بینی تنش برشی در مرزهای میدان. SSIIM برای محاسبه‌ی ارتفاع سطح اولیه‌ی آب در کانال از پارامتر استریکلر (K_{st}) استفاده می‌کند که در این رابطه n ضریب مانینگ می‌باشد:

$$K_{st} = \frac{1}{n} \qquad (۱٦)$$

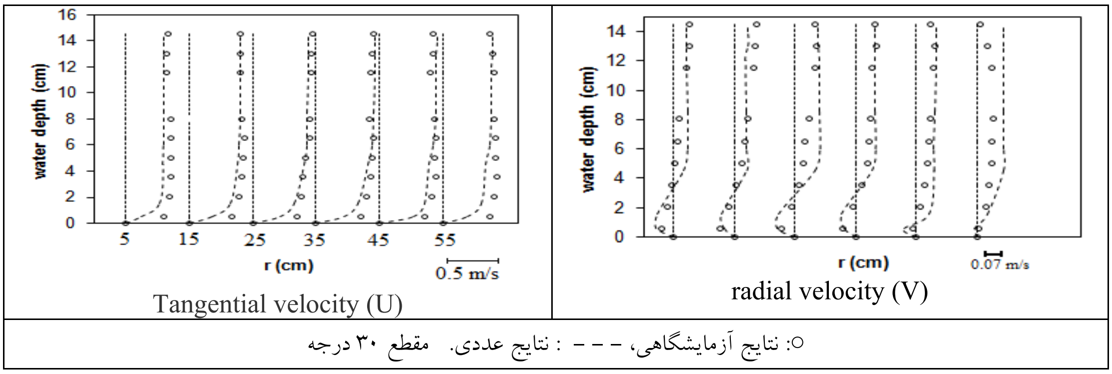
وانونی در سال (۱۹۷۵) رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی ضریب مانینگ ارائه داده‌است [22]:

$$n = \frac{k_s^{\frac{1}{6}}}{26} \qquad (۱۷)$$

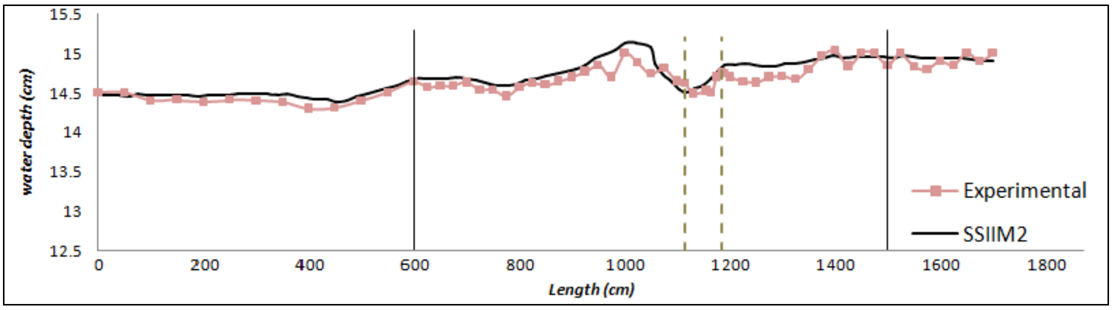
که در آن k_s زبری مؤثر ضریبی از d_{50} می‌باشد.

به‌منظور واسنجی مدل، با جای‌گذاری k_s=1d50=0.00128m، براساس رابطه‌ی ونونی حدس اولیه برای k_{st}=78.8 به‌دست می‌آید که نتایج حاصل از مدل سازی با مقدار اخیر برای k_{st} نشان می‌دهد سطح آب محاسبه‌شده در بالادست کمتر از حد انتظار است و لذا مدل‌سازی با مقادیر مختلف ks تکرار می‌شود تا ارتفاع سطح آب در بالادست منطبق بر مقدار آزمایشگاهی گزارش شده گردد. نتایج حاصل از تکرار مدل‌سازی نشان می‌دهد که در k_s=1.7d50 ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال هماهنگی مناسبی دارد. علاوه بر این با در نظر گرفتن k_s=1.7d50 پروفیل سرعت در نزدیک کف هماهنگی بهتری با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

به‌ازای مقدار بهینه‌ی به‌دست آمده برای ضریب مانینگ، مقادیر عددی و آزمایشگاهی پروفیل سرعت مماسی و شعاعی در مقطع عرضی ۳۰ درجه (به‌عنوان نمونه) با فواصل شعاعی ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ٤۵ و ۵۵ سانتی‌متر از لبه‌ی داخلی قوس بر روی بستر صلب با قطر ذرات بستر ۱/۲۸ میلی‌متر و دبی آبگیری ۳۰٪ برداشت شده و با نتایج عددی مقایسه شده‌است (شکل ٤). در این مقایسه محاسبات میانگین خطا برای سرعت مماسی ۳/٦۷٪ و برای سرعت شعاعی ۸/۷۹٪ می‌باشد. هم‌چنین تغییرات پروفیل سطح آب در امتداد خط مرکز کانال حاصل از مدل عددی در شکل (۵) با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده‌است.



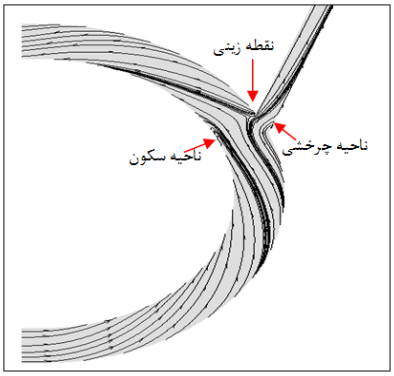
شکل ٤ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل‌های قائم سرعت مماسی و سرعت شعاعی در مقاطع ۳۰ درجه قوس



شکل ٥ مقایسه‌ی پروفیل سطح آب در میانه‌ی کانال حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

بررسی الگوی جریان در تراز نزدیک بستر و قدرت جریان ثانویه

شکل (٦) خطوط جریان در سه صفحه‌ی نزدیک بستر مدل عددی را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر این موضوع است که در ابتدای کانال خطوط جریان به‌شدت به سمت دیواره‌ی داخلی کشیده می‌شوند. الگوی کلی حاکم بر تراز نزدیک بستر انحراف به‌سمت جدار داخلی است. لذا انتظار داریم در یک کانال با بستر متحرک، مصالح کف به‌سمت دیواره‌ی داخلی حرکت کنند. خطوط جریان در جلوی دهانه‌ی آبگیر دارای برخی خصوصیات بارز و نقاط خاص می‌باشد که می‌توان از آن جمله به ناحیه‌ی چرخشی، ناحیه‌ی سکون که محل به دام افتادن رسوبات است و نقطه‌ی زینی که در ادامه شاهد خواهیم بود محل ورود رسوبات به آبگیر از این نقطه می‌باشد، اشاره کرد. در مقاطع بعد از آبگیر، برعکس مقاطع ورودی، مسیر حرکت ذرات به‌تدریج طولانی‌تر می‌شود و پس از خروج از قوس حالت موازی پیدا می‌کنند.



شکل ٦ الگوی جریان در تراز ۳ میلی‌متری از کف

با استفاده از نتایج میدان جریان حاصل از مدل عددی قدرت جریان ثانویه در قوس به‌صورت کمی بررسی شده است. معیار مهمی که برای قدرت جریان ثانویه در مراجع بدان اشاره شده است، معیار چرخش می‌باشد. طبق تعریف، نرخ خالص چرخش پادساعتگرد یک المان به ابعاد $\Delta x * \Delta y$ حول محور Z، قدرت گرداب نامیده می‌شود و به‌صورت رابطه‌ی (۱۸) قابل

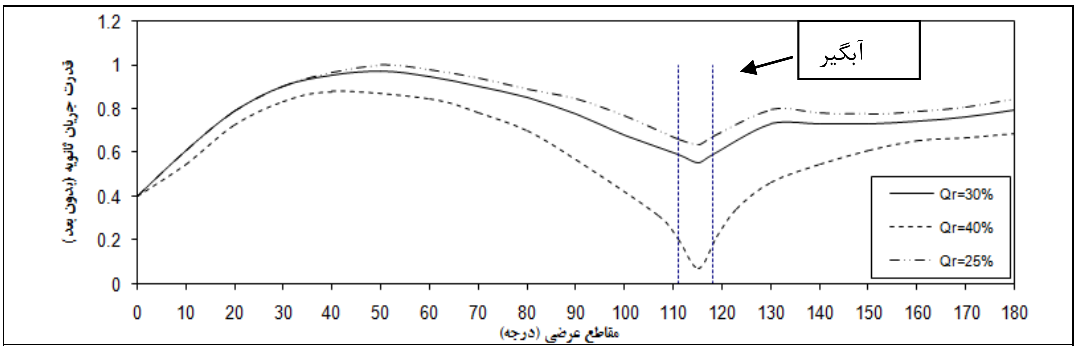
بیان است که در این رابطه $\overrightarrow{\omega_z}$ قدرت گردابه می‌باشد.

$$\overrightarrow{\omega_z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad (۱۸)$$

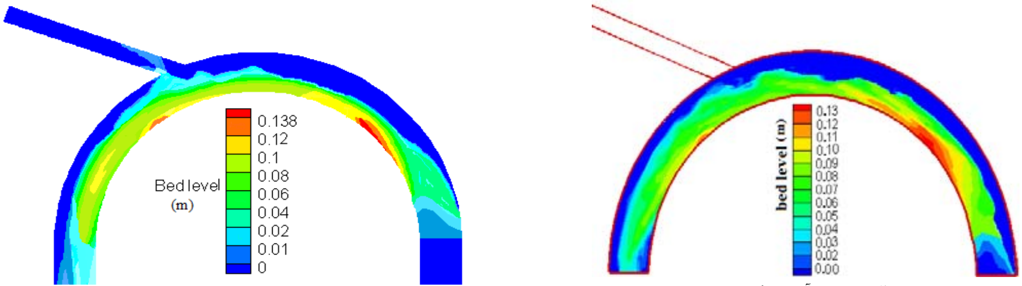
به‌منظور محاسبه‌ی قدرت جریان ثانویه در قوس با حضور آبگیر با استفاده از روش فوق هر مقطع عرضی براساس شبکه‌بندی که برای اندازه‌گیری جریان به‌کار برده شد، المان‌بندی گردید و قدرت گردابه برای هر المان محاسبه و با متوسط‌گیری از مقادیر فوق، قدرت متوسط جریان ثانویه در هر مقطع عرضی حاصل گردید. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود قدرت جریان ثانویه برای سه دبی آبگیری متفاوت ترسیم شده‌است که در تمامی این دبی‌های آبگیری جریان ثانویه تا مقطع ۵۰ درجه رشد می‌کند و پس از مقطع ۵۰ درجه دچار افت می‌شود و هرچه دبی آبگیری بیشتر باشد این کاهش قدرت جریان ثانویه محسوس‌تر می‌باشد به‌گونه‌ای که در وسط دهانه‌ی آبگیر به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین بعد از آبگیر قدرت جریان ثانویه دچار رشد محسوسی می‌گردد.

بررسی توپوگرافی بستر کانال قوسی در زمان تعادل

در شکل (۸) توپوگرافی بستر در زمان تعادل حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای Q_r=30% نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می شود الگوی توپوگرافی بستر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و مدل عددی تقریباً توانسته‌است پدیده‌های مورد انتظار در قوس را مانند دیون‌های متناوب و پشته‌های رسوبی در مقاطع ٤٥ و ۱۳٥درجه به‌خوبی پیش‌بینی کند. براساس نتایج مدل آزمایشگاهی، زمان تعادل آزمایش‌ها ٦ ساعت تعیین شده است. زمان تعادل زمانی انتخاب شده است که تغییرات فرم‌های بستر شکل‌گرفته در کانال در زمان ناچیز باشد. لذا زمان تزریق رسوب در مدل عددی ٦ ساعت انتخاب گردید. لازم به ذکر است با کامپیوتر در دسترس این اجرا با گام‌های زمانی ۱۵ ثانیه، ۱۹ ساعت به‌طول انجامید.

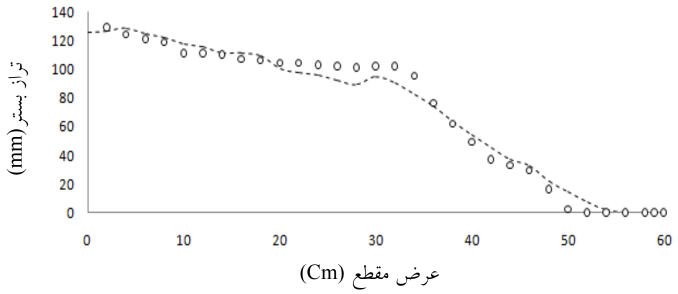


شکل ۷ قدرت جریان ثانویه در طول کانال قوسی با آبگیر جانبی

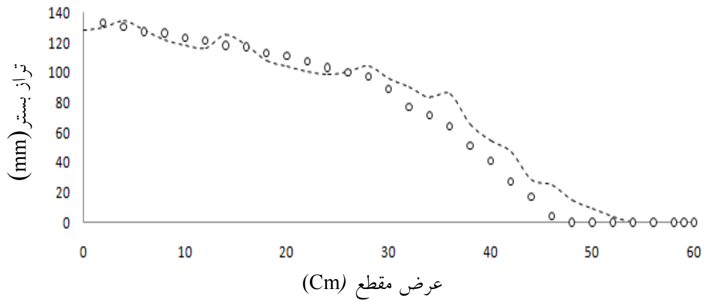


ب) مدل عددی
الف) مدل آزمایشگاهی

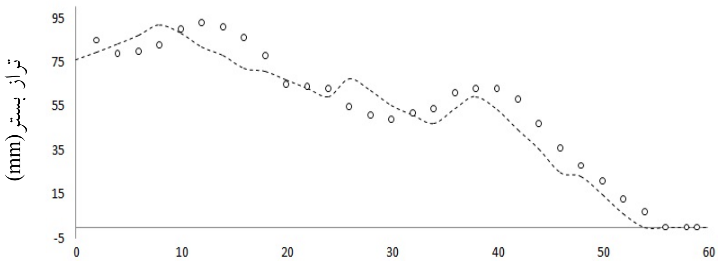
شکل ۸ توپوگرافی بستر در زمان تعادل حاصل از نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی– Qr=30%



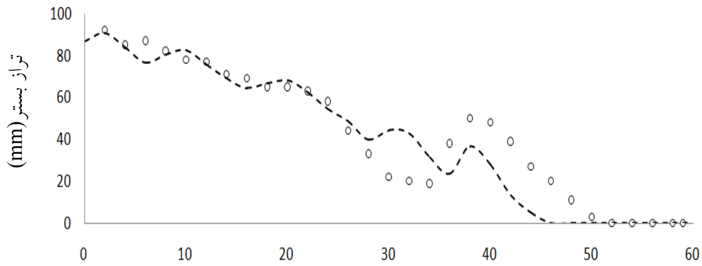
الف: مقطع ۳۵ درجه



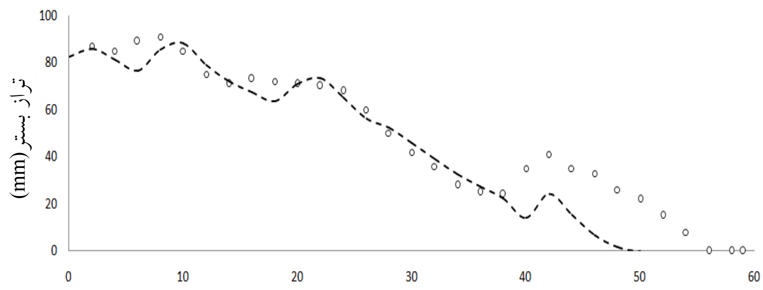
ب: مقطع ٤٥ درجه



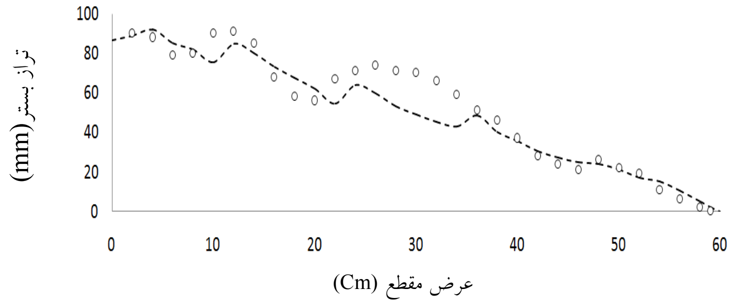
ج: مقطع ۹۰ درجه



د: مقطع ۱۱۱ درجه



ه: مقطع ۱۱۵ درجه



و: مقطع ۱۱۸ درجه

شکل ۹ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی تراز بستر در مقاطع مختلف قوس

o: نتایج آزمایشگاهی، - - - : نتایج عددی

در شکل (۹) نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مربوط به تغییرات عرضی تراز بستر در مقاطع عرضی ۳۵، ٤٥، ۹۰، ۱۱۱، ۱۱۵ و ۱۱۸ درجه در حالت دبی آبگیری ۳۰٪ پس از زمان تعادل آزمایش ها با هم مقایسه شده‌است. همان‌گونه که در این شکل دیده می شود الگوی کلی نتایج حاصل از مدل سازی عددی هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. به‌دلیل وجود جریان حلزونی که در کانال قوسی وجود دارد و جهت آن که در کف از قوس خارج به سمت قوس داخل است، ارتفاع توپوگرافی بستر در دیواره‌ی داخلی بیشتر از دیواره‌ی خارجی است. هم‌چنین وجود ناهمواری‌های بستر نزدیک قوس خارجی ناشی از حرکت دیون‌ها است که با مشاهدات آزمایشگاهی نیز تطابق دارد. در مقاطع ۱۱۱، ۱۱۵ و ۱۱۸ درجه که به‌ترتیب ابتدا، میانه و انتهای دهانه‌ی آبگیر می‌باشد، به‌دلیل مکش آبگیر و کاهش قدرت جریان حلزونی ذرات رسوب شکل پهن‌تری به خود می‌گیرند و در عرض کانال توسعه می‌یابند.

در ادامه با استفاده از دو شاخص آماری به مقایسه‌ی نتایج تراز بستر حاصل از داده های آزمایشگاهی و عددی پرداخته شده‌است. این دو شاخص آماری عبارتند از:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Z_{Mi} - Z_{Pi})^2} \qquad (۱۹)$$

$$E_{M} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Z_{Mi} - Z_{Pi}) \qquad (۲۰)$$

که در روابط بالا E_{RMS} ریشه‌ی متوسط مربع خطا ها، E_M متوسط خطا ها، N تعداد داده های آزمایشگاهی و Z_{Mi}، Z_{Pi} به‌ترتیب تراز بستر حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌باشد. مقدار خطاهای محاسبه‌شده برای هر مقطع عرضی در جدول (۳) نشان داده شده‌است.

مطالعه‌ی مکانیسم شکل‌گیری توپوگرافی بستر در کانال

به‌منظور بررسی روند حرکت رسوبات در کانال قوسی و مکانیسم شکل‌گیری توپوگرافی بستر، مدل در زمان‌های ۱۰، ۲۵، ۳۵، ٤٥ و ٦۰ دقیقه از زمان شروع تزریق رسوب برای دبی آبگیری ۳۰٪ اجرا شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است (شکل ۱۰).

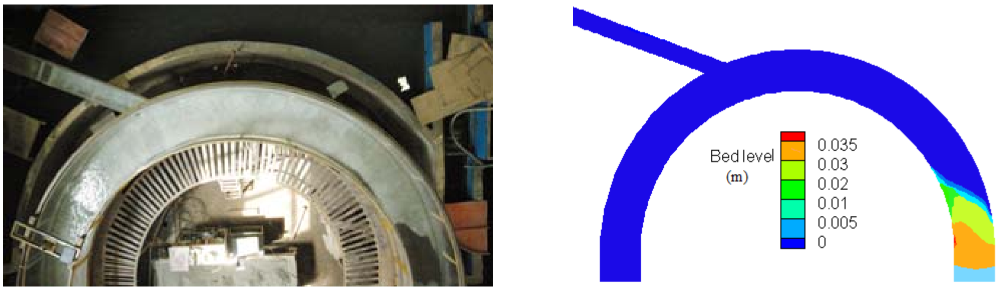
با ورود رسوبات به قوس، تا زاویه‌ی ۱۰ درجه از قوس، ذرات رسوب به‌صورت یکنواخت در عرض کانال حرکت می‌کنند و با قدرت گرفتن جریان ثانویه از این مقطع ذرات رسوب به‌سمت دیواره‌ی داخلی متمایل می‌شوند و رسوبات در کنار دیواره‌ی داخلی شروع به پیش‌روی می‌کنند و در زاویه‌ی ٤٥ درجه از

قوس نزدیک به دیواره‌ی داخلی یک پشته‌ی رسوبی تشکیل می شود و این پشته‌ی رسوبی در این موقعیت تثبیت می‌گردد. علاوه براین از مقطع ۷۰ درجه قوس، دیون‌های تناوبی که به‌سمت قوس خارجی متمایل هستند تشکیل می‌گردند و با نزدیک شدن رسوبات به آبگیر بر اثر مکش آبگیر رسوبات به سمت پایین‌دست آبگیر متمایل می‌شوند و در لبه‌ی پایین‌دست آبگیر تجمع می‌نمایند و ورود رسوبات به درون آبگیر از همین نقطه آغاز می‌شود.

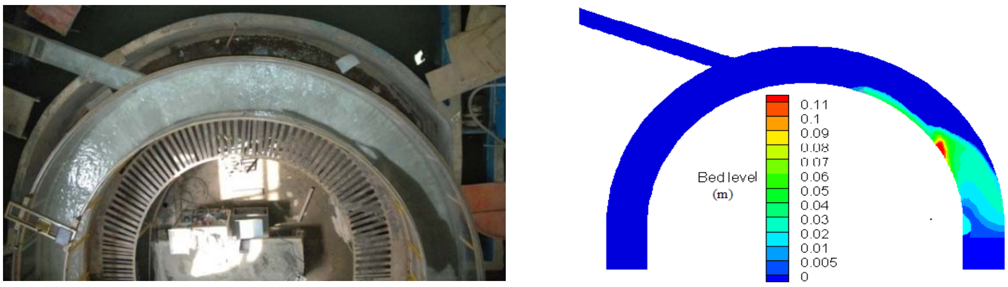
جدول ۳ مقایسه‌ی خطاهای تراز بستر حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

Cross-section(°)	ERMS (mm)	EM (mm)	خطا بصورت در صدی از مقدار آزمایشگاهی
35	6.3453	-0.3162	-0.45%
45	9.8274	-4.9464	-7.18%
90	7.85190	3.1488	5.85%
111	11.3828	2.5748	6.1%
115	10.9528	5.6512	11.96%
118	9.0184	3.0879	5.95%

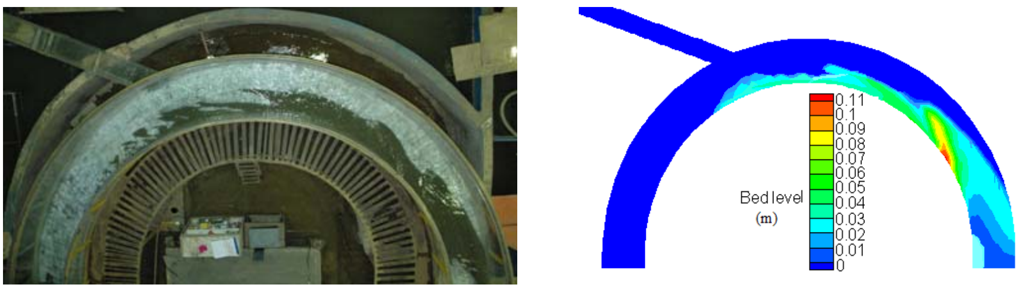
نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی   نتایج حاصل از مدل عددی



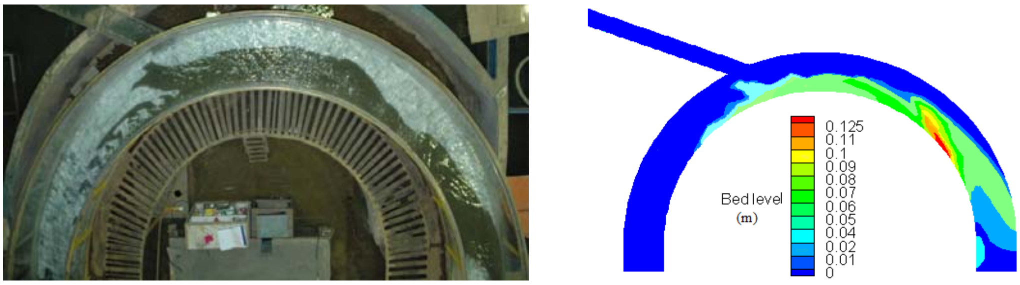
الف) زمان ۱۰ دقیقه از شروع تزریق



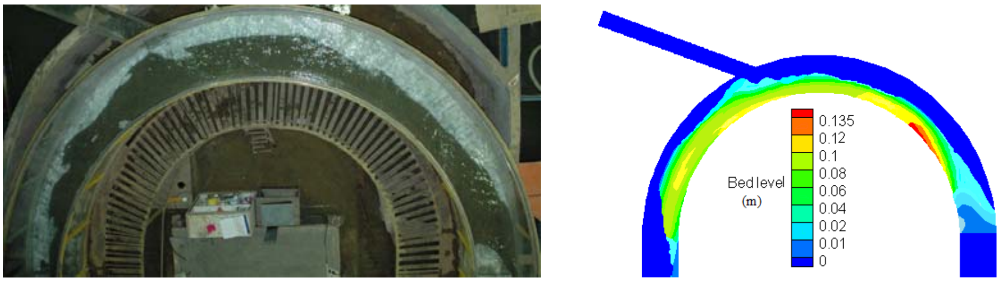
ب) زمان ۲۵ دقیقه از شروع تزریق



پ) زمان ۳۵ دقیقه از شروع تزریق



ت) در زمان۴۵ دقیقه از شروع تزریق



ج) در زمان۶۰ دقیقه از شروع تزریق

شکل ۱۰ شکل‌گیری توپوگرافی بستر برای دبی آبگیری ۳۰٪

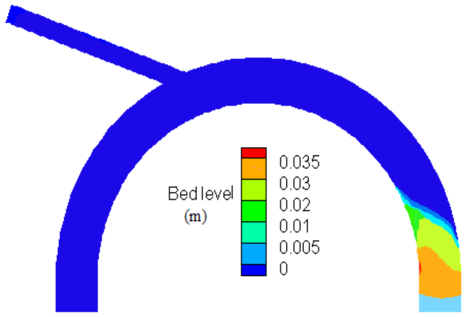
مطالعه‌ی پارامتریک روی اثر دبی آبگیری

به‌منظور بررسی اثر دبی آبگیری بر نحوه‌ی حرکت رسوبات، تغییرات زمانی توپوگرافی بستر برای دو دبی آبگیری ۲۵٪ و ۴۰٪ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. افزایش دبی آبگیری از ۳۰٪ به ۴۰٪ تا حوالی مقطع ۶۰ درجه از کانال خمیده تأثیری بر روی توپوگرافی بستر ندارد اما بعد از مقطع ۶۰ درجه به‌دلیل مکش بیشتر آبگیر پروفیل بستر توسعه‌ی عرضی بیشتری نسبت به حالت ۳۰٪ دارد. به عبارت دیگر ذرات رسوب به‌سمت دیواره‌ی خارجی متمایل می‌شوند و همچنین ارتفاع پشته‌های رسوبی در نزدیک دیواره‌ی داخلی تاحدودی کاهش می‌یابد (شکل ۱۳). مکانیسم ورود رسوبات به آبگیر مانند دبی آبگیری ۳۰٪ از لبه‌ی پایین دست آبگیر به درون آبگیر آغاز می‌گردد (شکل ۱۱–ت). اما به‌دلیل افزایش دبی آبگیری که نتیجه‌ی آن توسعه‌ی عرضی بیشتر پروفیل بستر می‌باشد، ورود رسوبات از لبه‌ی بالاد ست آبگیر نیز که نا شی از عبور متناوب دیون‌های تشکیل شده در امتداد دیواره‌ی خارجی قوس است، انجام می‌گیرد (شکل ۱۱–ج). افزایش دبی آبگیری موجب می شود در یک زمان مساوی، رسوبات کمتری به پایین‌دست آبگیر انتقال یابد و توپوگرافی نیمه‌ی دوم قوس در این زمان برخلاف دبی آبگیری ۳۰٪ شکل نگیرد که علت آن ورود زیاد رسوبات به درون آبگیر است (شکل ۱۱–ج و ۱۰–ج). همچنین ناحیه‌ای در پایین‌دست آبگیر در قوس داخلی وجود دارد که تا اواسط آزمایش در آن رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتاد. این ناحیه با عنوان ناحیه‌ی جدایی جریان در شکل (۱۱–ج) نشان داده شده‌است. بررسی توپوگرافی بستر در زمان تعادل، برای دبی آبگیری ۴۰٪ نمایانگر وجود دو پشته‌ی رسوبی بستر در مقاطع ۴۵ و ۱۲۷ درجه قوس می‌باشد.

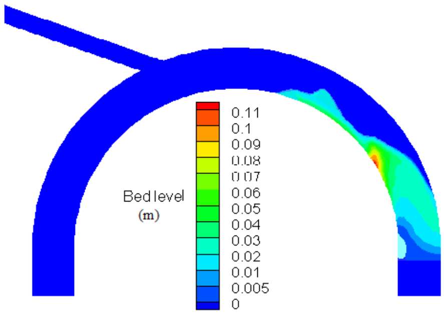
در حالت کاهش دبی آبگیری به ۲۵٪ توپوگرافی رسوبات توسعه‌ی عرضی کمتری به‌سمت قوس خارجی می یابد و بیشتر در امتداد دیواره‌ی داخلی به‌سمت پایین‌دست حرکت می‌کند (شکل ۱۲–الف، ب، پ). در این حالت رسوبات فقط از لبه‌ی پایین‌دست آبگیر به درون کانال آبگیر راه می‌یابند (شکل ۱۲–ت).

نکته‌ی قابل توجه این است که در همه‌ی حالات مختلف آبگیری دو پشته‌ی رسوبی نزدیک دیواره‌ی داخلی در مقاطع ۴۵ و ۱۳۵ درجه‌ی قوس تشکیل

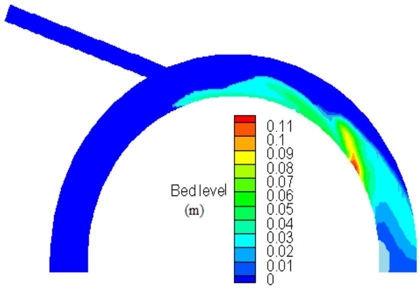
می‌شود که ارتفاع پشته‌ی رسوبی دوم نسبت به پشته‌ی رســوبی اول کمتر اســت. دلیل این امر کاهش قدرت جریان ثانویه بعد از آبگیر به‌علت انحراف بخشـــی از جریان توســط آبگیر اســت. نکته‌ی دیگری نیز که در توپوگرافی بســتر ملاحظه می‌شــود تناوبی بودن دیون‌ها می‌باشد که دلیل آن نوسانات سرعت عرضی در قوس است.



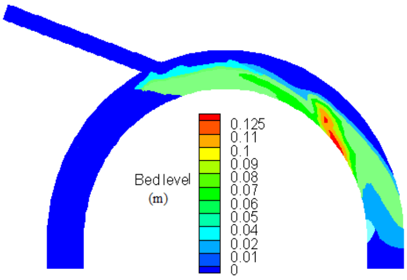
الف) نتایج مدل عددی در زمان ۱۰ دقیقه از شروع تزریق



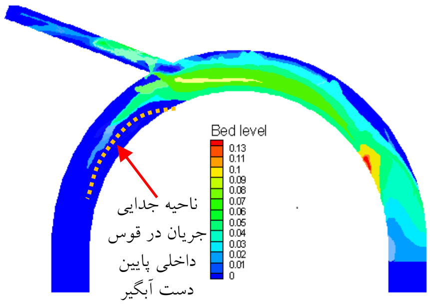
ب) نتایج مدل عددی در زمان۲۵ دقیقه از شروع تزریق



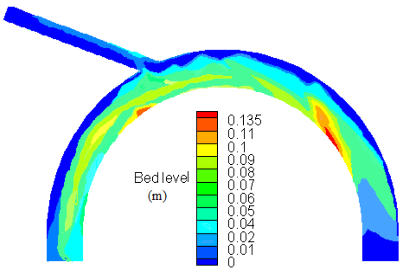
پ) نتایج مدل عددی در زمان ۳۵ دقیقه از شروع تزریق



ت) نتایج مدل عددی در زمان ٤٥ دقیقه از شروع تزریق

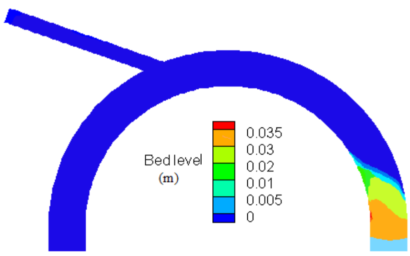


ج) نتایج مدل عددی در زمان ٦٠ دقیقه از شروع تزریق

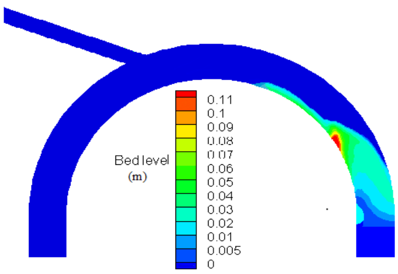


□) زمان تعادل

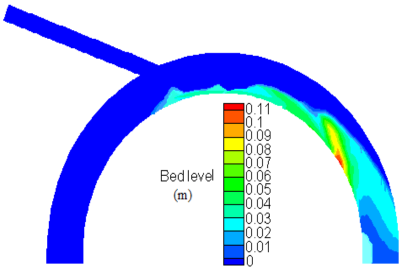
شکل ۱۱ نحوی حرکت ذرات رسوب برای دبی آبگیری ٤٠٪



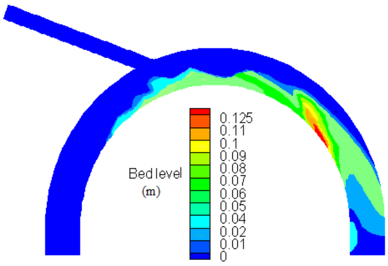
الف) نتایج مدل عددی در زمان ۱۰ دقیقه از شروع تزریق



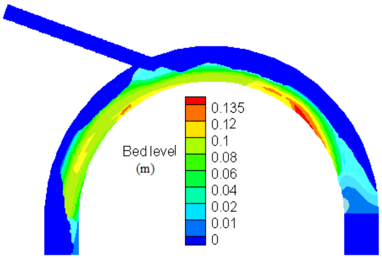
ب) نتایج مدل عددی در زمان۲۵ دقیقه از شروع تزریق



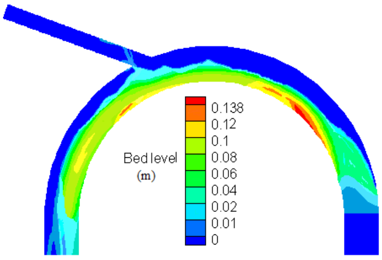
پ) نتایج مدل عددی در زمان ۳۵ دقیقه از شروع تزریق



ت) نتایج مدل عددی در زمان ٤٥ دقیقه از شروع تزریق

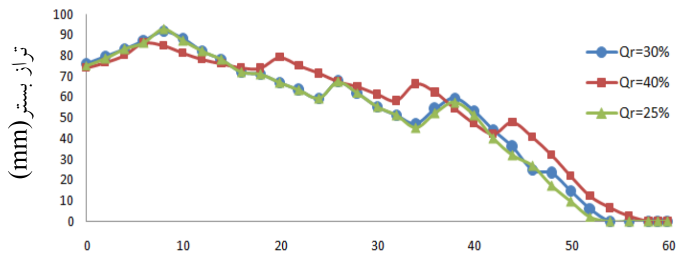


ج) نتایج مدل عددی در زمان ٦٠ دقیقه از شروع تزریق



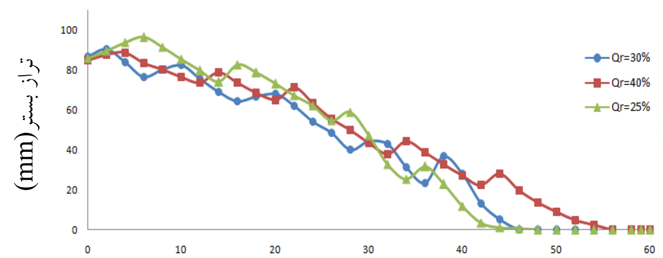
□) زمان تعادل

شکل ۱۲ شکل گیری توپوگرافی بستر برای دبی آبگیری ٪۲۵



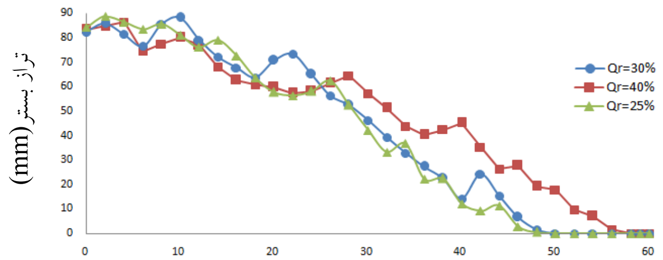
عرض مقطع (Cm)

مقطع ۹۰ درجه



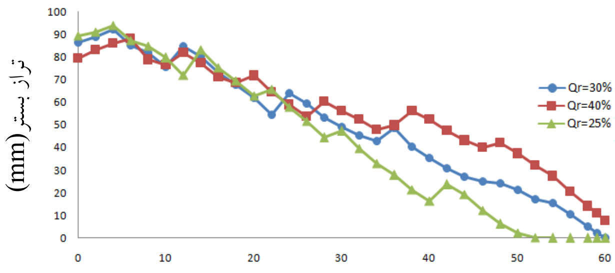
عرض مقطع (Cm)

مقطع ۱۱۱ درجه



عرض مقطع (Cm)

مقطع ۱۱۵ درجه



مقطع ۱۱۸ درجه

شکل ۱۳ تغییرات عرضی تراز بستر برای دبی‌های آبگیری مختلف

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی SSIIM2 به بررسی توپوگرافی بستر و نحوه‌ی حرکت رسوبات در کانال قوسی و با حضور آبگیر جانبی با روش تزریق رسوب روی بستر صلب پرداخته شده‌است. نتایج حاصل در این مقاله نشان می‌دهند مدل عددی استفاده شده، که یکی از مدل‌های سه‌بعدی در دسترس مهندسان می‌باشد، در شبیه سازی توپوگرافی بستر و نحوی حرکت رسوبات توانایی قابل قبولی دارد. بررسی نحوه حرکت رسوبات نشان می‌دهد که رسوبات تا زاویه‌ی ۱۰ درجه از قوس به‌صورت یکنواخت در عرض کانال حرکت می‌کنند و با قدرت گرفتن جریان ثانویه از این مقطع به‌سمت دیواره‌ی داخلی متمایل می شوند و رسوبات در کنار دیواره‌ی داخلی شروع به پیش‌روی می‌کنند و در زاویه‌ی ۴۵ درجه از قوس یک پشته‌ی رسوبی تشکیل می‌دهند و این پشته‌ی رسوبی در این موقعیت تثبیت می‌گردد. علاوه براین از مقطع ۷۰ درجه قوس، دیون های تناوبی که به سمت قوس خارجی متمایل هستند تشکیل می‌گردند. با نزدیک شدن رسوبات به آبگیر بر اثر مکش آبگیر رسوبات به‌سمت لبه پایین‌دست آبگیر متمایل می‌شوند و در لبه‌ی پایین‌دست آبگیر تجمع می‌نمایند و ورود رسوبات به درون آبگیر از همین نقطه برای کلیه‌ی دبی های آبگیری آغاز می‌شود. در دبی آبگیری ۴۰٪ پس از شکل‌گیری فرم‌های بستر در بالادست آبگیر و توسعه‌ی عرضی پروفیل بستر، دیون‌هایی که از مقطع ۷۰ درجه شکل می‌گیرند به‌صورت تناوبی از لبه‌ی بالادست آبگیر وارد آبگیر می‌شوند در حالی که در دبی آبگیری ۳۰٪ و ۲۵٪ رسوبات فقط از لبه‌ی پایین آبگیر وارد می‌شوند. پس از زمان تعادل آزمایش‌ها، یک پشته‌ی رسوبی در نیمه‌ی اول قوس و یک پشته‌ی رسوبی دیگر در نیمه‌ی دوم قوس در مقاطع ٤٥ و ۱۳۵ درجه شکل می‌گیرد که ارتفاع پشته‌ی رسوبی دوم نسبت به پشته‌ی رسوبی اول کمتر است.

مراجع

1. Rozovskii, I. L. "Flow of Water in Bend of Open Channel", *Kiev: Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering*, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, (1957).
2. Yen, B.C. and K.T. Lee. "Characteristics of Subcritical Flow in Meandering Channel", University of Iowa, Iowa, (1965).
3. Yen, C. L., "Bed configuration and characteristics of subcritical flow in meandering channel sorting in channel bend with unsteady flow", PhD thesis, University of Iowa, Iowa, (1967).
4. Engelund, F., "Flow and bed topography in channel bends", *J. Hydraulic Div.,* Vol. 100 No.11, pp.1631-1648, (1974).
5. Kikkawa, H., Ikeda, S and Kitagawa, A., "Flow and bed topography in curved open channel", *J.*

Hydraulic Div., Vol. 102, No. 9, pp. 1327-1342, (1976).

6. Falcon, M. A., and Kennedy, J. F., "Flow in alluvial river curves", *J. Fluid Mech.,* Vol. 133, pp. 1-16, (1983).
7. Allen, J. R. L., "A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits", *Geological J.,* Vol. 7, pp. 129-146, (1970).
8. Koch, F. G. and Flukstra, C., "Bed level computations for curved alluvial channels", Proc. XIXth congress of the Int. Assoc. for Hydrau. Res., New Delhi, India, 2, Vol. 357, (1981).
9. Odgaard, A. J., "Bed characteristics in alluvial channel bends", *J. Hydraulic Div*., Vol. 108 No.11, pp.1268-1281, (1982).
10. Odgaard, A. J., and Bergs, M. A., "Flow processes in a curved alluvial channel", Water Resour. Res., Vol. 24, pp. 45-56, (1988).
11. Shafai bajestan, M., Nazari, S., "The impression of the diversion angle of intake on the entering sediments to the lateral intakes at the vertical bond of river", *J. Agric.,* Chamran University, Vol. 22, No. 1, (1999).

۱۲. پیرستانی، محمدرضا، "بررسی الگوی جریان و آبشستگی در دهانه‌ی ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحنا"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، (۱۳۸۳).

۱۳. دهقانی، امیر احمد، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی در قوس°۱۸۰"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۵).

۱٤. ابوالقاسمی، م. "کنترل رسوب ورودی به آبگیرهای جانبی در مئاندر رودخانه"، رساله‌ی دکتری، دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۵).

۱۵. منتصری، حسین، "کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی با استفاده از صفحات مستغرق در قوس ۱۸۰ درجه"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۷).

۱٦. منصوری، امیررضا، "شبیه سازی سه‌بعدی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۵).

۱۷. شکیبائی‌نیا، احمد، زراتی، امیررضا و مجدزاده طباطبایی، محمدرضا، "کاربرد مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده‌ی مهندسی رودخانه"، نشریه‌ی دانشکده‌ی فنی، دوره‌ی ٤۲، شماره‌ی ٤، صص. ٤٤۳– ٤۵۵، (۱۳۸۷).

۱۸. کرمی‌مقدم، مهدی، شفاعی‌بجستانی، محمود و صدقی، حسین، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در آبگیر ۳۰ درجه منشعب از کانال ذوزنقه‌ای"، مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال پانزدهم، شماره‌ی پنجاه و هفتم، صص. ۳۵– ٤۷، (۱۳۹۰).

19. Van Rijn L. C., "Sediment transport, part II: suspended load transport", *Journal of Hydraulic Engineering,* ASCE; Vol.110, No.11, pp. 1613–1641, (1984).
20. Olsen, N. R. B., "SSIIM Users' Manual", The Norwegian University of Science and Technology, (2004).
21. Rhie, C. M., and Chow, W. L., "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation", *J. AIAA,* Vol. 21, pp. 1525-1532, (1983).
22. Vanoni, V.A. "Sediment Engineering", ASCE Manuals and reports on engineering practice-No 54, New York, (1975).